

УДК 621.396.67

ДОБРОТНОСТЬ АПЕРТУРНОЙ РЕЗОНАТОРНОЙ АНТЕННЫ

В.А. Бухарин, Н.И. Войтович

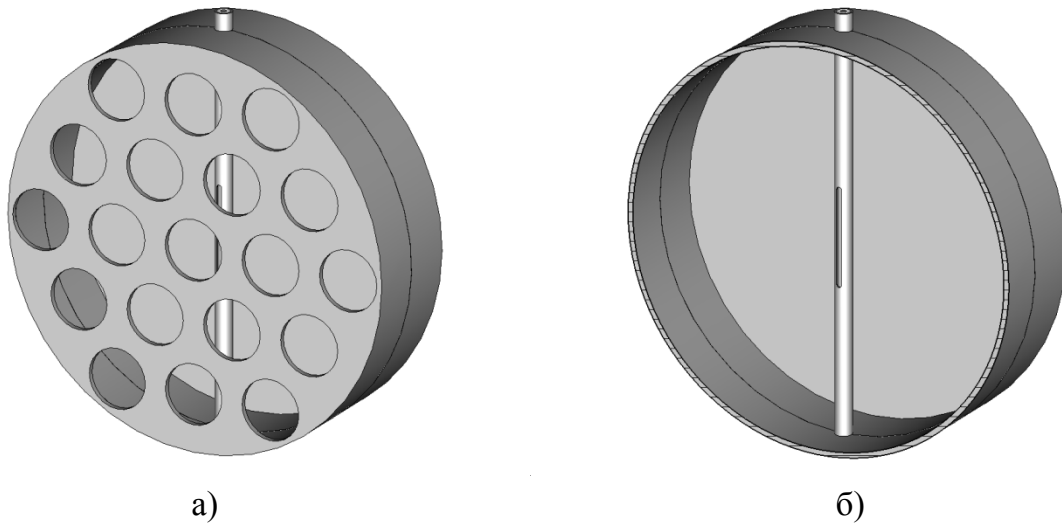
Решена проблема нахождения добротности апертурной резонаторной антенны с частично прозрачной плоской стенкой. Показано, что добротность цилиндрического резонатора зависит от свойств частично прозрачной стенки и от соотношения фазовой скорости неоднородной плоской волны и скорости плоской поперечной однородной волны в среде резонатора. Проведено сравнение добротности резонатора с частично прозрачной стенкой с добротностью резонатора Фабри-Перо. Приведены строгие электродинамические расчёты коэффициента отражения от частично прозрачной поверхности и добротности цилиндрического резонатора на примере первого промышленного образца упомянутой оригинальной антенны.

Ключевые слова: резонатор; добротность; резонаторная антенна; частично прозрачная поверхность.

Одномодовые апертурные резонаторные антенны с частично прозрачной стенкой обладают уникальными характеристиками [1]. Однако проектирование резонаторных антенн связано со сложными, трудоёмкими, строгими электродинамическими методами анализа [2]. Для инженерных расчётов требуются более простые и доступные методы. Создание инженерной методики проектирования апертурных резонаторных антенн является важной и актуальной задачей.

Апертурная резонаторная антенна изображена на рис. Антенна построена на основе двух связанных между собой резонаторов: цилиндрического резонатора с плоской частично прозрачной излучающей стенкой и размещённого в нём коаксиально-щелевого. В резонаторе в предельном случае полной непрозрачности стенки возбуждается основное колебание H_{111} . По существу, основная мода H_{111} определяет амплитудно-фазовое распределение в апертуре антенны.

Диаграмма направленности апертурной резонаторной антенны зависит от размеров апертуры и амплитудно-фазового распределения в апертуре. Согласование антенны с фидером зависит от положения полюсов объёмного цилиндрического и коаксиально-щелевого резонаторов в частотной области, от добротности резонаторов и коэффициента связи между резонаторами. Коэффициент связи между резонаторами можно регулировать двумя способами. Первый способ заключается в повороте коаксиально-щелевого резонатора вокруг оси симметрии коаксиальной линии передачи. Второй способ заключается в перемещении короткозамыкателя внутри коаксиальной линии передачи вдоль линии передачи в области излучающих щелей (на рис. не показан).



Апертурная резонаторная антенна: а) общий вид;
б) антенна без частично прозрачной поверхности

Добротность коаксиально-щелевого резонатора определяется шириной щели. Добротность объёмного резонатора зависит от свойств частично прозрачной стенки и от соотношения фазовой скорости неоднородной плоской бегущей волны и скорости поперечной плоской однородной волны в среде резонатора. Докажем это утверждение.

Основная мода колебаний в объёмном цилиндрическом резонаторе формируется в результате наложения двух бегущих вдоль оси цилиндра в противоположных направлениях дисперсионных волноводных волн. В результате отражения от стенок резонатора возникает стоячая волна – колебание H_{111} .

Энергия, запасённая в резонаторе на заданном типе колебания:

$$W(t) = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon \vec{E}^2(\vec{r}, t) + \mu \vec{H}^2(\vec{r}, t)] dV,$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; μ – абсолютная магнитная проницаемость среды; \vec{E} – вектор напряжённости электрического поля; \vec{H} – вектор напряжённости магнитного поля; \vec{r} – радиус-вектор точки интегрирования; V – объём цилиндрического резонатора антенны.

За период колебания T запас энергии в резонаторе изменится и будет равен:

$$W(t+T) = W(0)e^{-2\alpha(t+T)} = W(t)e^{-2\alpha T},$$

где α – коэффициент затухания, Нп/м.

Добротность объёмного резонатора, согласно определению:

$$Q = \frac{2\pi W(t)}{W(t) - W(t+T)} = \frac{2\pi W(t)}{W(t)(1 - e^{-2\alpha T})} = \frac{2\pi}{1 - e^{-2\alpha T}}.$$

Средний за период колебания поток мощности W одной бегущей волны через поперечное сечение цилиндрического волновода:

$$\frac{W}{2} \cdot \frac{1}{2L / v_{гр}},$$

где L – длина резонатора; $v_{гр}$ – групповая скорость волны.

Потери энергии на излучение одной бегущей волны на частично прозрачной стенке резонаторной антенны:

$$P_{п} = \frac{W}{2} \cdot \frac{1}{2L / v_{гр}} \cdot (1 - |\dot{\rho}|^2),$$

где $\dot{\rho}$ – коэффициент отражения от частично прозрачной стенки. Две бегущие волны за период колебания в объёмном резонаторе теряют в два раза больше энергии.

Добротность объёмного резонатора антенны с учётом двух бегущих дисперсионных волн:

$$Q = \omega \frac{W}{P_{п}} = \frac{\omega W}{2 \cdot \frac{W}{2} \cdot \frac{1}{2L / v_{гр}} \cdot (1 - |\dot{\rho}|^2)} = \frac{k}{\frac{v_{гр}}{c}} \cdot \frac{2L}{1 - |\dot{\rho}|^2},$$

где ω – круговая частота; c – скорость поперечной плоской однородной волны; $v_{гр}$ – групповая скорость неоднородной плоской волны; $k = \omega / c$ – волновое число. Групповую скорость волны можно выразить через фазовую скорость волны: $v_{гр} = c^2 / v_{ф}$. Тогда добротность:

$$Q = \frac{k}{\frac{c}{v_{ф}}} \cdot \frac{2L}{1 - |\dot{\rho}|^2}.$$

Формула добротности апертурной резонаторной антенны полностью совпадает с формулой для добротности резонатора Фабри-Перо [3], если учесть, что в резонаторе Фабри-Перо имеется две частично отражающие поверхности и потерь будет в два раза больше.

Проведём проверку формулы добротности апертурной резонаторной антенны. Воспользуемся строгими электродинамическими методами расчёта. Прямым временным методом [2] найдём коэффициент затухания

объёмного цилиндрического резонатора, по формуле добротности апертурной резонаторной антенны определим коэффициент отражения от частично прозрачной поверхности. С другой стороны, коэффициент отражения от частично прозрачной поверхности найдём из задачи дифракции на бесконечно большой двумерно-периодической структуре с такими же параметрами как у частично прозрачной поверхности резонаторной антенны, используя ячейки Флоке. Сравним полученные значения.

Рассмотрим апертурную резонаторную антенну (см. рис.), имеющую следующие геометрические параметры: диаметр цилиндра $1,55\lambda$; λ – длина волны, соответствующая резонансной частоте объёмного цилиндрического резонатора; длина резонатора $0,497\lambda$; толщина стенки частично прозрачной поверхности $0,00332\lambda$; диаметр отверстий $0,2724\lambda$; расстояние между отверстиями $0,31\lambda$. Излучающие отверстия расположены в узлах равнобедренной треугольной сетки.

Расчёты по первому пространственно-временному методу дают $Q=29,456$; $|\rho|=0,878$. Расчёты по второму пространственно-частотному методу дают $|\rho|=0,845$. Относительная ошибка меньше 4%. Ошибку можно объяснить следующим образом. Частично прозрачная стенка апертурной резонаторной антенны ограничена диаметром резонатора антенны, следовательно, доля отверстий немного меньше чем в бесконечной двумерно-периодической структуре. Поэтому коэффициент отражения немного больше чем для бесконечной структуры. Кроме того, в формуле не учитывается устройство возбуждения объёмного цилиндрического резонатора – коаксиально-щелевой резонатор.

Заключение. Получена простая формула добротности апертурной одномодовой резонаторной антенны с частично прозрачной поверхностью. Формула совпадает с хорошо известной формулой добротности резонатора Фабри-Перо. Выражение связывает коэффициент отражения от частично прозрачной поверхности резонаторной антенны с добротностью апертурной резонаторной антенны. Достоверность формулы проверена независимыми строгими электродинамическими численными методами. Формула будет полезна при инженерном проектировании резонаторных антенн.

Библиографический список

1. Бухарин, В.А. Плоская резонаторная антенна / В.А. Бухарин, Н.И. Войтович, Н.Н. Репин // Сборник трудов Второй Всероссийской научно-технической конференции «РАДИОВЫСОТОМЕТРИЯ-2007». – Екатеринбург: ИД «Третья столица», 2007. – С. 160–164.
2. Бухарин, В.А. Пространственно-временной метод расчёта резонаторных антенн / В.А. Бухарин, Н.И. Войтович // Научные труды международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2011» в рамках VIII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011». – Екатеринбург: ООО «Компания Реал-Медиа», 2011. – С. 371–373.

3. Пегель, И.В. Электродинамика сверхвысоких частот: учебное пособие / И.В. Пегель. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 158 с.

[К содержанию](#)